

**Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**



Кафедра електроенергетики

**ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА, РОЗПОДІЛУ ТА СПОЖИВАННЯ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ**

для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Дніпро
2021

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол №2 . від 22.02.2022) за поданням методичної комісії спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол № 21/22-01 від 30.08.2021).

Луценко І.М.

Основи виробництва, розподілу та споживання електроенергії. Методичні рекомендації до лабораторних занять для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / І.М. Луценко, Н.Ю. Рухлова, Є.В. Кошеленко, П.С. Циган, М.С. Кириченко; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2021. – 35 с.

Автори:

Луценко І.М., канд. техн. наук, проф.;
Рухлова Н.Ю., канд. техн. наук, доц.;
Кошеленко Є.В., канд. техн. наук, доц.;
Циган П.С., аспірант;
Кириченко М.С., асистент.

Методичні матеріали призначено для практичної підготовки студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», які здобувають освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавра.

Методичні матеріали є корисними під час підготовки до модульного контролю за результатами лабораторних занять із дисципліни «Основи виробництва, розподілу та споживання електроенергії», що входить до обов'язкової частини ОПП бакалавра спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Методичні рекомендації присвячено дослідженню показників графіків систем генерації та споживання електроенергії та впливу нерівномірності графіка електричних навантажень на економічність процесів виробництва електричної енергії, а також – використанню теоретичних та емпіричних методів розрахунку електричних навантажень і вибору потужності компенсуючих пристроїв електричних мережах з метою забезпечення енергоефективності режимів роботи систем електропостачання.

Наведено критерії оцінювання модульних контрольних робіт.

Рекомендації орієнтовано на активізацію виконавчого етапу навчальної діяльності студентів.

ЗМІСТ

1. Лабораторна робота ОВРСЕ-1 «Визначення показників графіків електричних навантажень».....	4
2. Лабораторна робота ОВРСЕ-2 «Визначення впливу нерівномірності графіка електричних навантажень на економічність виробництва електричної енергії»	11
3. Лабораторна робота ОВРСЕ-3 «Розрахунок електричних навантажень»	17
4. Лабораторна робота ОВРСЕ-4 «Компенсація реактивної потужності в електричних мережах»	25
 РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ.....	 33

1. Лабораторна робота ОВРСЕ-1 « Визначення показників графіків електричних навантажень»

Мета роботи: досягти результату навчання: знати і розуміти принципи роботи електричних систем та мереж, силового обладнання електричних станцій та підстанцій і вміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності, через визначення та аналіз основних показників графіків електричних навантажень (ГЕН) енергосистеми та побудову добових ГЕН енергосистеми України.

Загальні положення

При вивченні режимів роботи систем виробництва, розподілу та споживання енергії користуються трьома видами електричних навантажень, які характеризують режими роботи споживачів електричної енергії. Це активна (P) і реактивна (Q) потужності, струм I або повна потужність (S). Зміна цих величин в часі і прийнято називати *графіками електричних навантажень*.

На етапі проектування електроенергетичних об'єктів прогнозовані ГЕН отримують за результатами моделювання технологічних процесів або на основі аналогічних/ідентичних об'єктів, які вже перебувають в експлуатації.

На етапах реконструкцій, технічного переоснащення або модернізації об'єктів енергетики графіки електричних навантажень будують за фактичними даними вимірювальних приладів (лічильники електричної енергії) або інформаційно-вимірювальних систем для обліку і контролю витрат електроенергії (АС-КОЕ, АСУ ТП).

Графіки електричних навантажень вивчають для виявлення закономірностей формування так максимумів активної і реактивної потужностей (півгодинних або іншої тривалості), які визначають:

- нагрів елементів системи електропостачання (СЕП);
- рівень напруги у електроприймачів;
- ефективність використання встановленого обладнання для виявлення недовантажених/перевантажених елементів мереж, резервів пропускної спроможності тощо.

Вони використовуються також при складанні договорів на користування електроенергією між підприємствами і енергопостачальними організаціями та прогнозування необхідного виробництва для енергосистеми в цілому.

Для енергосистеми показники графіків виробництва/споживання електричної енергії дозволяють сформуванню відповідний баланс, а також проаналізувати вплив показників споживання на ефективність роботи системи виробництва електричної енергії.

Не менший інтерес для аналізу режимів роботи СЕП представляють мінімальні (півгодинні і більшої тривалості) значення активної і реактивної потужностей, а також середні їх значення за зміну, добу, рік та інші періоди.

Для характеристики графіків електричних навантажень або споживання електричної енергії промисловими, муніципальними та ін. об'єктами, роботи підприємств в цілому, окремих цехів або технологічних ліній, агрегатів і виробництв за потужністю і часом застосовують ті або інші, звичайно безрозмірні, коефіцієнти – показники ГЕН. Причому, в основному переважна більшість коефіцієнтів характеризують режими споживання електричної енергії, і лише деякі дозволяють проаналізувати ефективність режимів виробництва електричної енергії електростанціями, які працюють в маневреному (нестационарному) режимі.

Об'єднана енергетична система України - сукупність електростанцій, електричних і теплових мереж, інших об'єктів електроенергетики, які об'єднані спільним режимом виробництва, передачі та розподілу електричної і теплової енергії при централізованому управлінні цим режимом;

Об'єкт електроенергетики - електрична станція (крім ядерної частини атомної електричної станції), електрична підстанція, електрична мережа, підключені до об'єднаної енергетичної системи України, а також котельня, підключена до магістральної теплової мережі.

В даній роботі необхідно: проаналізувати графіки виробництва/споживання електричної енергії в електроенергетичній системі України в цілому за фактичними даними ретроспективних добових режимів її роботи, наданих національним оператором системи передачі ПрАТ «Національна енергетична компанія «Укренерго» (<https://ua.energy/>).

До основних показників ГЕН, які характеризують режим роботи енергосистеми та графік виробництва/споживання енергії, відносяться наступні:

Коефіцієнт максимуму за активною потужністю K_m дорівнює відношенню максимального з середніх півгодинних (чи іншої тривалості) навантажень P_m , який виявленій за розрахунковий період T , до середньої потужності P_{cp} за той самий період:

$$K_m = \frac{P_m}{P_{cp}} \quad (1)$$

Коефіцієнт заповнення графіка за активною потужністю $K_{з.г}$ характеризує ступінь нерівномірності ГЕН:

$$K_{з.г} = \frac{P_{cp}}{P_m} \quad (2)$$

Коефіцієнт форми індивідуального (групового) ГЕН за активною потужністю K_ϕ має фізичний сенс, якщо визначається для конкретного провідника, апарату стосовно потужності, що передається по цих елементах СЕП та нагріву відповідних елементів:

$$K_{\phi} = \frac{P_{ск}}{P_{ср}}, \quad (3)$$

де: $P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N P_i^2 \cdot \Delta t_i}$ – середньоквадратичне (діюче) значення потужності за розрахунковий період T (цикл, зміна, доба, рік та інші). У цьому виразі: i – порядковий номер інтервалу, на які розбитий досліджуваний ГЕН; $(P_i, \Delta t_i)$ – відповідно потужність в i -ому інтервалі і тривалість цього інтервалу.

Середньоквадратична потужність використовується при оцінці втрат потужності в провідниках, які пропорційні квадрату навантаження.

Тривалість використання максимуму активного навантаження T_m , год/рік:

$$T_m = \frac{W_T}{P_m}. \quad (4)$$

де W_T – сукупне споживання електроенергії за період, що розглядається (цикл, зміна, доба, рік) кВт·год;

P_m – значення максимальної потужності за період, що розглядається, кВт.

Нерівномірність ГЕН ЕЕС прийнято характеризувати коефіцієнтом нерівномірності $K_{нер}$.

Коефіцієнт нерівномірності графіка електричних навантажень за активною потужністю $K_{з.з}$ характеризує ступінь нерівномірності ГЕН:

$$K_{нер} = P_{мін.нч} / P_{макс} \quad (5).$$

Цей коефіцієнт відображає економічність вироблення ЕЕ на станціях ЕЕС. Усі зусилля ЕЕС спрямовані на доведення $K_{нер}$ як можна ближче до одиниці.

Порядок виконання роботи

Аналіз показників роботи ЕЕС України за фактичними ГЕН з визначенням відповідних коефіцієнтів графіків.

За даними оператора системи передачі виконати аналіз ГЕН характерної доби (для цього за кожною годиною доби визначити з ГЕН відповідні показники):

- визначити добове виробництво електричної енергії за кожним видом електростанцій (АЕС, ТЕС ГК, ТЕЦ, ГЕС та ГАЕС, ВДЕ).

Необхідно скористатися посиланням:

<https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnytstva-spozhyvannya-e-e/>, прийнявши споживання/генерацію протягом години осередненою за двома сусідніми значеннями.

Дата: 19.12.2019

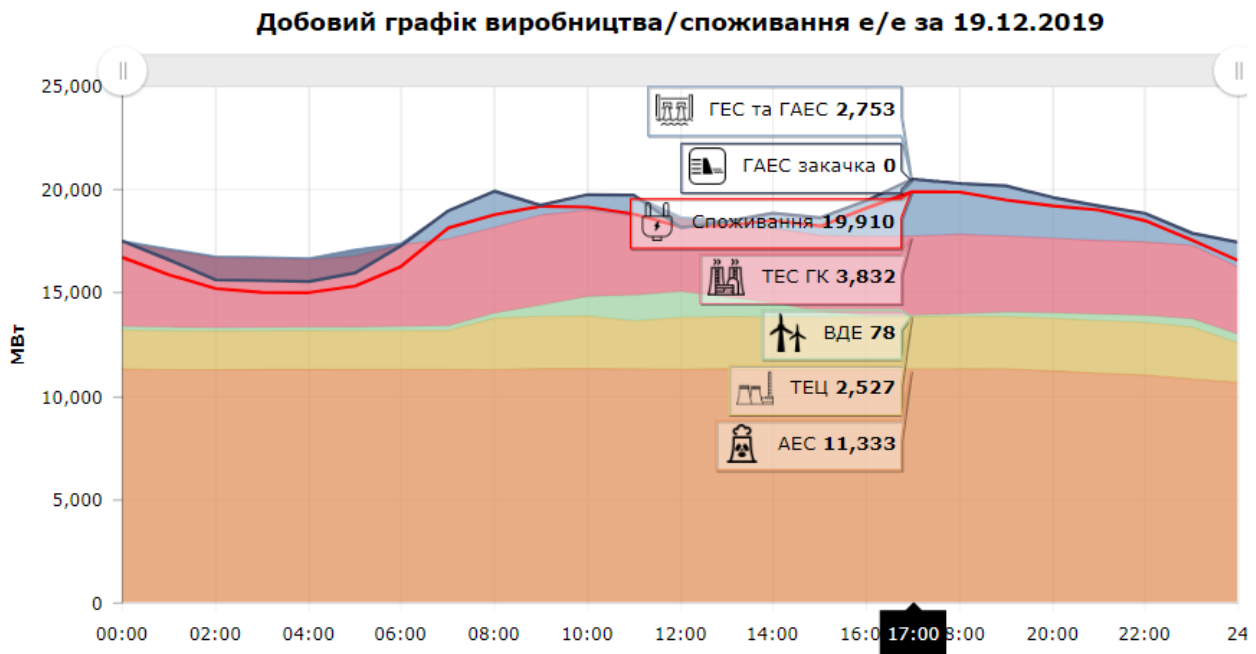


Рис. 1 – Графік електричного навантаження енергосистеми України

Наприклад, для визначення обсягу енергії, що виробляється 19.12.2018 для ГЕС та ГАЕС, необхідно виконати наступні дії:

$$P_{17:00} = 2,753 \text{ ГВт}; P_{18:00} = 2,463 \text{ ГВт}; \Delta t = 1 \text{ год}$$

$$P_{\text{ген.17-18}} = (P_{17:00} + P_{18:00})/2 = (2,753 + 2,463)/2 = 2,608 \text{ ГВт}$$

$$W_{\text{ген.17-18}} = P_{\text{ген.17-18}} \cdot \Delta t = 2,608 \cdot 1 = 2,608 \text{ ГВт} \cdot \text{год}$$

- визначити сумарне добове споживання електричної енергії: *виконується аналогічно наведеному вище прикладу за ГЕН споживання.*

- порівняти баланс виробництва/споживання електричної енергії та зробити висновок про причини різниці в балансі: *визначити добове споживання й генерацію електричної енергії та знайти різницю.*

БАЛАНС ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2017 р., млрд кВт·год

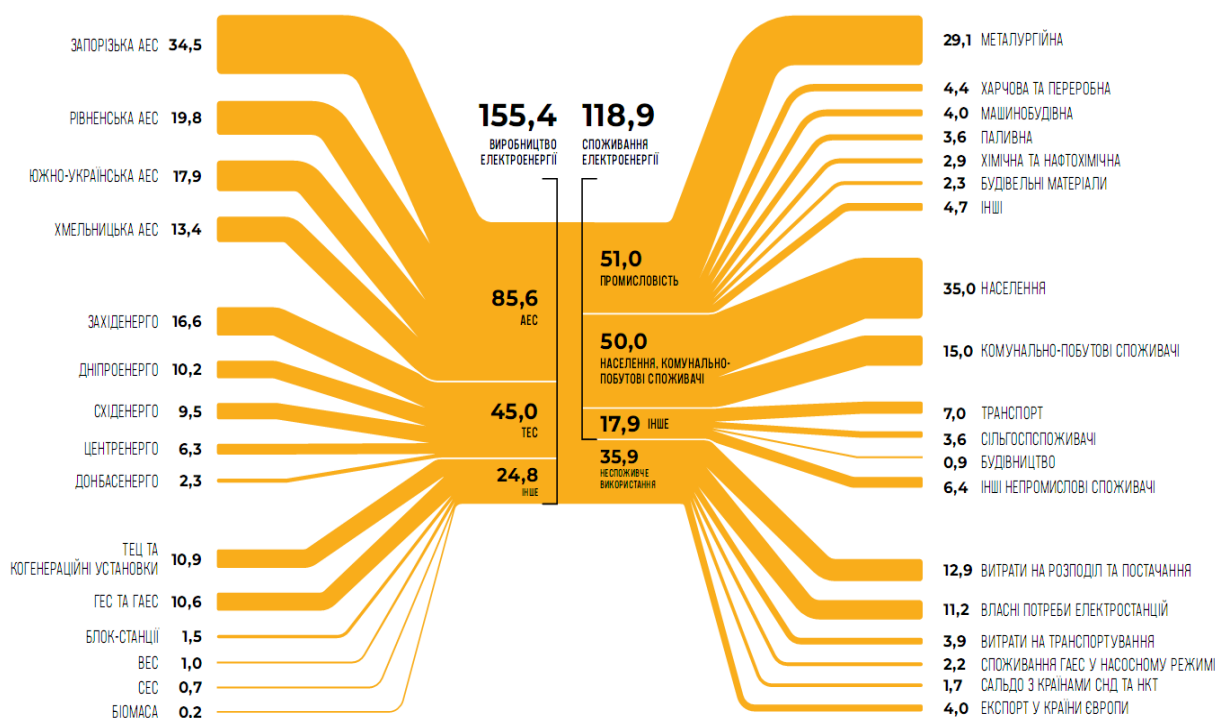


Рис. 2 – Річний баланс виробництва/споживання електричної енергії в ЕЕС України (2017 р.)

- визначити частку кожного виду системи виробництва (джерела) в загальному енергобалансі (за добу), %:

$$W_{\text{ДЖ}^*} = (W_{\text{доб.дж.і.}} / W_{\text{доб.дж}\Sigma}) \cdot 100\%,$$

де $W_{\text{доб.дж.і}}$ – добове виробництво електричної енергії окремим видом станцій (АЕС, ГЕС та ГАЕС, ТЕС ГК, ТЕЦ, ВДЕ);

$W_{\text{доб.дж}\Sigma}$ - добове виробництво електричної енергії всіма електростанціями.

Рекомендовано провести відповідні розрахунки 1 раз у якості прикладу у звіті до роботи, а потім аналогічним чином з використанням програмного продукту Microsoft Excel.

За результатами виконання розрахунків, сформувані відповідну таблицю значень та висновки за результатами проведених розрахунків.

Вигляд таблиці може бути наступним:

Таблиця 1

**Визначення показників роботи енергосистеми України протягом доби за
ГЕН**

Тип станції/ год	АЕС, ГВт	ТЕС ГК, ГВт	ТЕЦ, ГВт	ГЕС та ГА- ЕС, ГВт	ВДЕ, ГВт	Закачка ГАЕС, ГВт	Споживання, ГВт
00:00							
01:00							
02:00							
...							
23:00							
Добові показники:							
Р _м , ГВт							
Р _{мін} , ГВт							
Р _{сер} , ГВт							
Р _{ср.кв} , ГВт							
К _м							
К _{з.г}							
К _ф							
К _{нер.}							

Таблиця 2

**Визначення показників виробництва/споживання електроенергії протягом
доби за ГЕН**

Тип станції/ $\Delta t=1$ год	АЕС, ГВт·год	ТЕС ГК, ГВт·год	ТЕЦ, ГВт·год	ГЕС та ГАЕС, ГВт·год	ВДЕ, ГВт·год	Закачка ГАЕС, ГВт·год	$W_{\text{доб.дж}\Sigma}$, ГВт·год	Споживання, ГВт·год
00:00 – 01:00								
01:00 – 02:00								
...								
23:00 – 24:00								
Добові показники:								
$W_{\text{доб}}$, ГВт·год								
$W_{\text{дж}^*}$, %								
T_m , год								

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Графік виробництва/споживання електроенергії за відповідну добу.
3. Таблиці з результатами оцифровки даних.
4. Графіки навантажень за активною потужністю для складових енергобалансу.
5. Розрахункові показники ГЕН і величини, що характеризують режим виробництва/споживання електроенергії в ЕЕС України.
6. Висновки щодо отриманих результатів розрахунку.

Контрольні запитання

1. Якими джерелами енергії представлена система генерації в умовах України?
2. Які показники характеризують ГЕН енергосистеми України та її окремих складових?
3. За допомогою яких пристроїв і приладів можна отримати графіки електричних навантажень?
4. За який період часу необхідно мати ГЕН, щоб в повному обсязі розрахувати показники графіків і основні розрахункові величини?
5. Чи відрізнятимуться значення півгодинного і годинного максимумів навантаження, визначені для одного і того ж ГЕН?
6. Які джерела енергії переважають в енергобалансі України?
7. Які типи споживачів або галузі промисловості є найбільш енергоємними для умов України?

2. Лабораторна робота ОВРСЕ-2 « Визначення економічного потенціалу вирівнювання ГЕН з позицій зменшення витрати вугілля на ТЕС ГК»

Мета роботи: досягти результату навчання: знати принципи роботи біоенергетичних, вітроенергетичних, гідроенергетичних та сонячних енергетичних установок, розуміти значення традиційної та відновлюваної енергетики для успішного економічного розвитку країни, аналіз режимів споживання/генерації електричної енергії (ЕЕ) в енергосистемі України та аналіз впливу нерівномірності ГЕН на економічність вироблення електричної енергії на теплових електростанціях.

Загальні положення

Теплові електростанції (ТЕС) є найбільшим типом електрогенерації після атомної. Станом на початок 2019 року за встановленою потужністю теплова генерація залишається абсолютним чемпіоном із часткою 43,7% (21,8 ГВт), у той час як виробництво електроенергії ТЕС у 2018 році становить 30% (47,8 млрд кВт·год.) від загального обсягу. Загальний принцип їхньої роботи – спалення вугільного пилу (або інших видів палива) для отримання високоенергетичної пари, яка приводить у рух електрогенеруючі турбіни.

Енергоблоки ТЕС потужністю 100-200 МВт, які можуть ефективно використовуватися як маневрові потужності, складають близько 15% від загальної генерації, проти 30–35%, необхідних за сучасних умов для гарантування стабільної та безперебійної роботи електроенергетичного сектору. Проблема ускладнюється високим рівнем технічного зношення всіх ТЕС (78% блоків вже відпрацювали понад парковий термін експлуатації 200 тис. год.). При цьому поширеною практикою є використання в маневрових напівпікових режимах пиловугільних блоків потужністю 300 МВт, які розраховані на роботу в базовому режимі і не пристосовані до маневрового використання. Така експлуатація енергоблоків теплових електростанцій, є додатковим чинником пришвидшеного зношення їхнього обладнання і загрожує зростанням аварійності.

Серед інших небезпек генерації ТЕС – залежність від кам'яного енергетичного вугілля, видобуток та поставки якого протягом останніх років значно ускладнилися. Окрім цього вугільні ТЕС продукують найбільший «вуглецевий слід» - кількість парникових газів на одиницю виробленої енергії (<http://map.ua-energy.org/categories/elektroenerhija/tes>).

Розглянемо потенційний ефект зниження витрати палива на теплових електростанціях за рахунок зменшення глибини роботи енергоблоків в маневрених режимах.

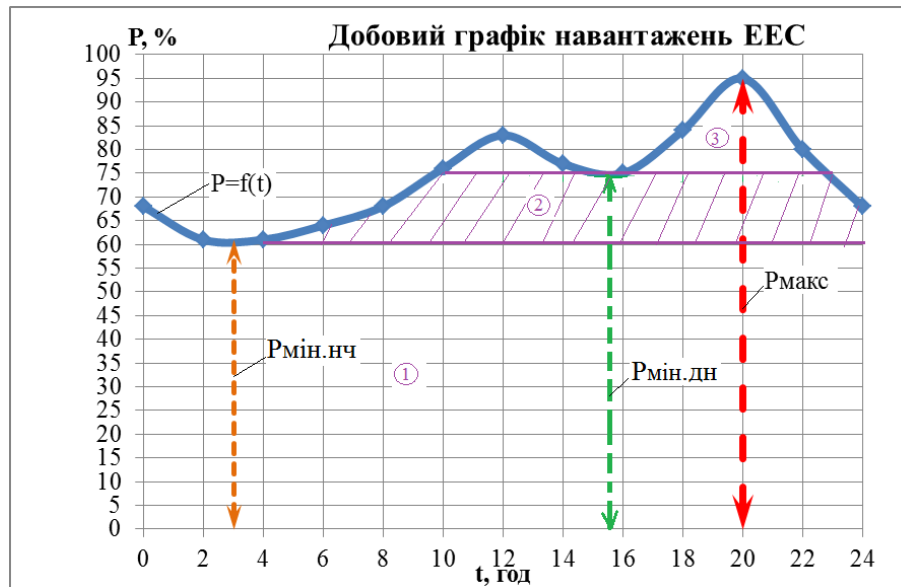


Рис. 1 – Схематичний пояснювальний добовий графік ЕЕС

Добовий графік навантажень ЕЕС має, як правило, два явно виражених піка – ранковий та вечірній. Між ними знаходиться зона відносно зниженого навантаження (напівпік). Глибоке зниження навантаження (так званий нічний провал) спостерігається, звичайно, вночі тривалістю 6-8 годин.

У добовому ГЕН ЕЕС (рис. 1) слід виділяти базову частину, поз.1, яка обмежена мінімальним нічним навантаженням $P_{\text{мін.нч}}$ (забезпечується АЕС), та змінну (забезпечується ТЕС ГК, ГЕС, ГАЕС). В свою чергу змінна частина поділяється на півпікову, поз. 2, між мінімальним нічним и мінімальним денним $P_{\text{мін.дн}}$ навантаженнями, і пікову, поз. 3, між мінімальним денним $P_{\text{мін.дн}}$ і максимальним $P_{\text{макс}}$ навантаженнями.

Нерівномірність ГЕН ЕЕС прийнято характеризувати коефіцієнтом нерівномірності $K_{\text{нер}}$:

$$K_{\text{нер}} = P_{\text{мін.нч}} / P_{\text{макс}}.$$

Цей коефіцієнт відображає економічність вироблення ЕЕ на станціях ЕЕС. Усі зусилля ЕЕС спрямовані на доведення $K_{\text{нер}}$ як можна ближче до одиниці.

Для характеристики добових ГЕН використовується також коефіцієнт заповнення ГЕН $K_{з.г} = P_{\text{ср}} / P_{\text{макс}}$, рівний відношенню середньодобового навантаження до максимального і річна кількість годин максимального навантаження:

$$T_M = W_{\text{річ}} / P_{\text{макс}},$$

де $W_{\text{річ}}$ – річне вироблення електроенергії.

Характеристики ТЕС ГК ЕЕС України

Потужність блока, МВт	ТЕС, № блока, проектне паливо	ККД котла бруто, %	Питома витрата тепла на турбіну, ккал/кВт·год	Питома витрата палива на відпуск електроенергії г у.п./кВт·год	Питома вартість реконструкції дол. США/кВт
150	№ 9 Придніпровська (АШ)	84,8	2056	400,5	303
200	№ 5 Старобешівська (АШ)	86,0	2146	412,1	130
300	№ 3 Криворізька (П)	84,8	1938	378,0	183
200	№ 7 Бурштинська (Г)	88,5	2089	382,8	278
300	№ 1 Запорізька (Г)	90,5	1933	356,4	205
210	№ 4 Старобешівська (шлам)	88,0	2174	407,1	
325	№ 8 Зміївська (АШ, П)	85,3	1827	356,3	

Згідно таблиці 1, питома витрата палива на ТЕС ГК складає в номінальному режимі роботи (рівномірний режим) 356,3...412,1 г/кВт·год. Фактично, при нерівномірному (маневреному режимі) цей показник може збільшуватися у 1,5-2 рази, що призводить до перевитрати палива. Маневрені режими генерації електроенергії ТЕС ГК виникають протягом ранкового і вечірнього піків, а внаслідок розвитку генерації ВДЕ – навіть протягом денного напівпіку. Це призводить до так-званого «зелено-вугільного парадоксу»: чим більше невідповідної генерації ВДЕ, тим більше потрібно спалювати вугілля на ТЕС ГК для покриття нерівномірності ГЕН.

Проаналізуємо як змінюються витрати на вироблення 1 кВт·год ЕЕ на ТЕС в залежності від кількості годин використання встановленої потужності P_o (для спрощення аналізу P_o приймається рівною P_{\max}).

Нерівномірність споживання ЕЕ приведе до збільшення витрат на її вироблення.

Витрати палива для генерації електроенергії залежать від багатьох складових, а також від коефіцієнту заповнення графіка $K_{зз}$ або T_{\max} .

Питомі витрати палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії:

$$g_{0y.n} = \frac{g_{0m}}{\eta_{e.n.}/100} + \frac{230}{T_M}, \text{ кг/кВт·год.}$$

Теоретична витрата палива на вироблення 1 кВт·г електроенергії:

$$g_{0.m} = \frac{Q_{0n}}{Q_{0y.n.}} = \frac{3,6}{29,3} = 0,123 \text{ кг/кВт·год.}$$

де Q_{0n} – вміст теоретичної теплоти в одиниці електроенергії, складає 1 кВт·год=3,6 МДж;

$Q_{0y.n.}$ – питома теплота згорання умовного палива 29,3 МДж/кг;

$\eta_{e.n.} = \eta_{ка} - b \cdot A_v$ – коефіцієнт використання палива, %

$\eta_{ка}$ – ККД котлоагрегату нетто, % (30-40%);
 b – коефіцієнт технічного стану котла (0,2-0,3);
 $A_г$ – зольність вугілля (20, 30, 35, 40%).

Паливна складова вартості 1 кВт·год електричної енергії знаходиться за виразом:

$$z_{го} = g_{0у.н} \cdot C_{0.н} \cdot 10^{-3}, \text{ грн/ кВт}\cdot\text{год}$$

де $C_{0.н}$ – питома вартість палива, грн/т.

Приклад. Визначимо зниження витрат (економічний ефект) для ТЕС України при збільшенні кількості годин використання максимуму навантажень від $T_M = 4000$ год на рік до $T_M = 7300$ год на рік за рахунок більш рівномірного завантаження енергетичного обладнання як наслідок вирівнювання ГЕН споживачів. Визначити паливну складову у собівартості вироблення 1 кВт·год ЕЕ.

Річне вироблення ЕЕ ТЕС України склало за 2017 рік $W \approx 45$ млрд кВт·год (див. енергобаланс), середня ставка відпускнуго тарифу для енергогенеруючих підприємств (ТЕС) на ОРЕ $C_W = 2,94$ грн/ кВт·год. Зольність вугілля – 30 %, ККД котла – 40 %, технічний стан котла $b = 0,3$, питома вартість палива (вугілля) – 2800 грн/т.

Питомі витрати палива на вироблення 1 кВт·г електроенергії:

$$g_{0у.н1} = \frac{g_{0m}}{\eta_{г.н.} / 100} + \frac{230}{T_{M1}} = \frac{0,123}{31/100} + \frac{230}{4000} = 0,454 \text{ кг/кВт}\cdot\text{г};$$

$$g_{0у.н2} = \frac{g_{0m}}{\eta_{г.н.} / 100} + \frac{230}{T_{M2}} = \frac{0,123}{31/100} + \frac{230}{7300} = 0,428 \text{ кг/кВт}\cdot\text{г};$$

де теоретична витрата палива на вироблення 1 кВт·г електроенергії:

$$g_{0.н} = \frac{Q_{0н}}{Q_{0у.н}} = \frac{3,6}{29,3} = 0,123 \text{ кг/кВт}\cdot\text{г};$$

$\eta_{г.н.} = \eta_{ка} - b \cdot A_г = 40 - 0,3 \cdot 30 = 31\%$ – коефіцієнт використання палива, %;

$\eta_{ка}$ – ККД котлоагрегату, % (30-40%);

b – коефіцієнт технічного стану котла (прийнято 0,3);

$A_г$ – зольність вугілля, 30%.

Паливна складова вартості 1 кВт·год електричної енергії знаходиться за виразом:

$$Z_{T0.1} = g_{0y.n1} \cdot C_{0.n} \cdot 10^{-3} = 0,454 \cdot 2800 \cdot 10^{-3} = 1,271 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год};$$

$$Z_{T0.2} = g_{0y.n2} \cdot C_{0.n} \cdot 10^{-3} = 0,428 \cdot 2800 \cdot 10^{-3} = 1,198 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}.$$

Зниження витрат (економічний ефект) для ТЕС України при збільшенні кількості годин використання максимуму навантажень

$$\Delta Z^* = Z_{T0.1} - Z_{T0.2} = 1,217 - 1,198 = 0,019 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

$$\Delta Z = K_{непр} \Delta Z^* W_{\Sigma} = 0,019 \cdot 45 \cdot 10^9 = 855 \text{ млн.грн}$$

Ефект отриманий без урахування, витрат пов'язаних з пуском, зупинками і утриманням у гарячому резерві енергообладнання, задіяного для роботи системи у змінній частині добового ГЕН.

Задачею студента є виконання аналогічного аналізу для конкретного добового ГЕН, згідно завдання, приймаючи, що кожна доба року є ідентичною до тієї, що розглядається. Значення T_m , до якого слід привести фактичне значення складає 8760 год, що відповідає рівномірному режиму роботи.

Примітка. Потрібно розуміти, що в реальних умовах кожна доба є унікальною, а сезонні показники виробництва/споживання електричної енергії можуть суттєво змінюватися. Для точної оцінки слід було б проаналізувати кожен окрему добу протягом року, але в даній лабораторній роботі такого завдання не ставиться.

Порядок виконання роботи

Для виконання роботи необхідно:

1. Отримати завдання у викладача за формою:

Завдання

Дата, за якою досліджується ГЕН (2017-2019 рр.): _____.

Тривалість дослідження – доба (рік).

2. Виконати розрахункове завдання за наведеною методикою, оформити та зробити висновки.

Оцінювання знань з напряму лабораторної роботи відбувається шляхом перевірки розрахункової частини та усного опитування за наведеними контрольними запитаннями.

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Добовий графік навантажень ЕЕС.
3. Розрахункові показники ГЕН і величини, що характеризують режим виробництва/споживання електроенергії в ЕЕС України.
4. Розрахунок потенціалу зниження витрати палива на теплових електростанціях при вирівнювання ГЕН електроспоживання.
5. Висновки щодо отриманих результатів розрахунку.

Контрольні запитання

1. Якими джерелами енергії представлена система генерації в умовах України?
2. Що характеризують величини $K_{нер}$ і T_m ? Як вони визначаються та впливають на процеси виробництва електричної енергії?
3. За допомогою яких пристроїв і приладів можна отримати графіки електричних навантажень?
4. Чи відрізнятимуться значення півгодинного і годинного максимумів навантаження, визначені для одного і того ж ГЕН?
5. Які фактори зумовлюють нерівномірність споживання електричної енергії?
6. Що таке «зелено-вугільний парадокс», внаслідок чого він виникає?

3. Лабораторна робота ОВРСЕ-3 «Розрахунок електричних навантажень»

Мета роботи: досягти результату навчання: знати і розуміти принципи роботи електричних систем та мереж, силового обладнання електричних станцій та підстанцій і вміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності, через оволодіння методами розрахунку електричних навантажень струмоприймачів промислових підприємств, дослідження та аналіз результатів розрахунку електричних навантажень груп струмоприймачів за наведеними методами, вирівнювання завантаження основного електрообладнання СЕП за допомогою моделювання (перерозподілу) навантажень.

Загальні положення

Основою раціонального вирішення комплексу техніко-економічних питань при проектуванні системи електропостачання (СЕП) сучасного промислового підприємства є визначення очікуваних електричних навантажень.

Для рішення основних задач електропостачання визначаються:

1. Середні навантаження:

а) за максимально завантаженою зміну (активне $P_{зм}$, реактивне $Q_{зм}$, повне $S_{зм}$ і струмове $I_{зм}$);

б) за рік (активне $P_{ср}$, реактивне $Q_{ср}$, повне $S_{ср}$ і струмове $I_{ср}$).

Активне $P_{зм}$ і реактивне $Q_{зм}$ навантаження використовуються для визначення максимальних (розрахункових) значень активного P_m і реактивного Q_m навантаження, а величини $P_{ср}$ і $Q_{ср}$ – для визначення витрати електроенергії за рік.

2. Максимальні навантаження:

а) тривалістю 30 хвилин (розрахункові активне P_m , реактивне Q_m , повне S_m , струмове I_m навантаження).

Ці величини необхідні для розрахунку перетинів провідників за нагрівом та економічною густиною струму, вибору потужності трансформаторів, перетворювачів, джерел реактивної потужності та іншого електромережного устаткування, визначення втрат і відхилень напруги, максимальних втрат електричної енергії та інших характеристик системи електропостачання;

б) тривалістю 1-2 с (звичайно визначаються I_n чи повне S_n , рідше активне P_n і реактивне Q_n навантаження). Ці навантаження називаються "піковими", вони є необхідними для оцінки коливань напруги, вибору плавких вставок запобіжників, уставок автоматичних вимикачів і струму спрацьовування елементів релейного захисту, перевірки електричної мережі за умовами самозапуску електродвигунів.

В проектуванні використовують декілька методів визначення розрахункових електричних навантажень:

- метод коефіцієнта попиту;
- статистичний модифікований метод.

Для невеликих об'єктів і вузлів, в основному у гірничій промисловості, доцільно виконувати розрахунки навантажень *методом коефіцієнта попиту*, який є найбільш простим, проте переважно дає значне завищення розрахункового навантаження, особливо при його застосуванні для умов, відмінних від базових (для яких було отримано відповідні значення коефіцієнтів).

Порядок розрахунку електричних навантажень за даним методом приведено нижче, а представлення результатів виконується у відповідності до форми (див. табл. 1).

Для групи однорідних за режимом роботи, пов'язаних єдиним технологічним процесом струмоприймачів (СП), розрахункові навантаження визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} P_m &= K_n \cdot P_{ном}; \\ Q_m &= P_m \cdot \operatorname{tg} \phi; \\ S_m &= \sqrt{P_m^2 + Q_m^2} = \frac{P_m}{\cos \phi}, \end{aligned}$$

де K_n – коефіцієнт попиту даної групи СП, прийнятий за довідковими даними;

$P_{ном}$ – сумарна номінальна потужність групи СП;

$\operatorname{tg} \phi$ – відповідає характерному для даної групи СП коефіцієнту потужності $\cos \phi$, який також визначається за довідковими даними.

Розрахункове навантаження вузла СЕП (цеху, корпусу, підприємства) за цим методом визначається підсумовуванням розрахункових навантажень окремих груп СП, що входять у даний вузол, з урахуванням коефіцієнта різночасності максимумів навантаження за виразом:

$$S_m = \sqrt{\left(\sum_1^n P_m \right)^2 + \left(\sum_1^n Q_m \right)^2} \cdot K_{p.m},$$

де $\sum_1^n P_m$, $\sum_1^n Q_m$ – відповідно сума розрахункових активних та реактивних навантажень окремих груп СП;

$K_{p.m}$ – коефіцієнт різночасності максимумів навантаження окремих груп СП, прийнятий у межах $0,85-1,0$ в залежності від місця даного вузла в системі електропостачання підприємства.

Розрахунок електричних навантажень методом коефіцієнта попиту

Номер п/п	Найменування вузлів живлення і груп СП	Кількість СП	Встановлена потужність СП, приведена до ТВ=100%, кВт	Коефіцієнт попиту K_n	$\frac{\cos\varphi}{\operatorname{tg}\varphi}$	Максимальне навантаження			$I_M = \frac{S_M}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \text{ А}$
						$P_M = K_n \cdot P_{ном}$ кВт	$Q_M = P_M \cdot \operatorname{tg}\varphi - Q_{ck}$ квар	$S_M = \sqrt{P_M^2 + Q_M^2}$ кВА	

Розрахунок навантажень потужних вузлів (цехів, ГЗП, РП та інші) доцільно виконувати за **модифікованим статистичним методом**, який для даних випадків надає найбільш достовірні результати.

Розрахунок електричних навантажень за модифікованим статистичним методом виконується за наступним алгоритмом:

1. Визначається груповий коефіцієнт використання:

$$k_{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^m (k_{\theta i} n_i p_{ni})}{\sum_{i=1}^m (n_i p_{ni})},$$

де m – кількість груп струмоприймачів однакової номінальної потужності;
 n – кількість одиничних струмоприймачів у групі з однаковими номінальними параметрами.

2. Визначається зведена (ефективна) кількість струмоприймачів:

$$N_e = \frac{\left(\sum_{i=1}^m n_i p_{ni} \right)^2}{\sum_{i=1}^m (n_i p_{ni}^2)}$$

3. Визначається коефіцієнт розрахункової активної потужності $K_p = f(N_e, k_{\theta})$ за табл. 3 або 4.

4. Визначається розрахункова активна потужність струмоприймачів:

$$P_p = K_p P_c = K_p \sum_{i=1}^m (k_{\theta i} n_i P_{ni})$$

5. Визначається розрахункова реактивна потужність:

а) для мереж напругою до 1кВ ($T < 30$ хв)

$$Q_p = \begin{cases} 1,1Q_c, & \text{якщо } N_e \leq 10; \\ Q_c, & \text{якщо } N_e > 10, \end{cases}$$

де $Q_c = \sum_{i=1}^m (k_i n_i P_{ni} \operatorname{tg} \varphi_i)$ – середня реактивна потужність групи струмоприймачів;

б) для магістральних шинопроводів, цехових ТП, а також для визначення реактивної потужності для цеху, корпусу, підприємства в цілому ($T = 150$ хв):

$$Q_p = K_p Q_c.$$

6. Визначається розрахункова повна потужність струмоприймачів:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

7. Визначається найбільша потужність окремого струмоприймача групи S_{nmi} та здійснюється перевірка: якщо $S_p < S_{nmi}$, то $S_p = S_{nmi}$.

Для вибору перерізу провідників живлення струмоприймачів, що працюють у повторно-короткочасному режимі, їх потужність зводять до тривалості вмикання $TB=100\%$, тобто:

$$P_n = P_{n.пасп} \sqrt{TB/100}$$

де $P_{n.пасп}$ – номінальна паспортна потужність струмоприймача.

Таблиця 2

Сталі часу нагрівання елементів СЕП

$T = 10$ хв	Для мережі напругою до 1 кВ, що живить розподільні шинопроводи, пункти, щити (значення K_p для цих мереж можна прийняти з
$T = 150$ хв	Для цехових трансформаторів і магістральних шинопроводів (значення K_p можна прийняти з табл. 4)

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів K_p для кабелів і проводів напругою до 1000 В

N_e	Груповий коефіцієнт використання K_e ($T=10$ хв)								
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
1	8.00	5.33	4.00	2.67	2.00	1.60	1.33	1.14	1.0
2	6.22	4.33	3.39	2.45	1.98	1.60	1.33	1.14	1.0
3	4.05	2.89	2.31	1.74	1.45	1.34	1.22	1.14	1.0
4	3.24	2.35	1.91	1.47	1.25	1.21	1.12	1.06	1.0

N_e	Груповий коефіцієнт використання K_e ($T=10$ хв)								
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	2.84	2.09	1.72	1.35	1.16	1.16	1.08	1.03	1.0
6	2.64	1.96	1.62	1.28	1.14	1.13	1.06	1.01	1.0
7	2.49	1.86	1.54	1.23	1.12	1.10	1.04	1.0	1.0
8	2.37	1.78	1.48	1.19	1.10	1.08	1.02	1.0	1.0
9	2.27	1.71	1.43	1.16	1.09	1.07	1.01	1.0	1.0
10	2.18	1.65	1.39	1.13	1.07	1.05	1.0	1.0	1.0
11	2.11	1.61	1.35	1.1	1.06	1.04	1.0	1.0	1.0
12	2.04	1.56	1.32	1.08	1.05	1.03	1.0	1.0	1.0
13	1.99	1.52	1.29	1.06	1.04	1.01	1.0	1.0	1.0
14	1.94	1.49	1.27	1.05	1.02	1.0	1.0	1.0	1.0
15	1.89	1.46	1.25	1.03	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
16	1.85	1.43	1.23	1.02	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
17	1.81	1.41	1.21	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
18	1.78	1.39	1.19	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
19	1.75	1.36	1.17	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20	1.72	1.35	1.16	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
21	1.69	1.33	1.15	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22	1.67	1.31	1.13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
23	1.64	1.30	1.12	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
24	1.62	1.28	1.11	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
25	1.6	1.27	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
30	1.51	1.21	1.05	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
35	1.44	1.16	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
40	1.4	1.13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
45	1.35	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50	1.3	1.07	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
60	1.25	1.03	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
70	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
80	1.16	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
90	1.13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів розрахункового навантаження K_p на шинах НН цехових ТП і для магістральних шинопроводів напругою до 1 кВ

N_e	Груповий коефіцієнт використання K_e ($T=150$ хв)							
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	≥ 0.7
1	8.0	5.33	4.0	2.67	2.00	1.60	1.33	1.14
2	5.01	3.44	2.69	1.9	1.52	1.24	1.11	1.0
3	2.94	2.17	1.8	1.42	1.23	1.14	1.08	1.0
4	2.28	1.73	1.46	1.19	1.06	1.04	1.0	0.97
5	1.31	1.12	1.02	1.0	0.98	0.96	0.94	0.93
(6.. 8)	1.2	1.0	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91
(9.. 10)	1.1	0.97	0.91	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
(11..25)	0.8	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9
(26.. 50)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.8	0.85	0.85
Більше 50	0.65	0.65	0.65	0.7	0.7	0.75	0.8	0.8

За наявності в довідкових матеріалах інтервалів значень k_e під час розрахунку необхідно прийняти їх найбільші значення. Перелік навантаження, необхідний для початку розрахунку, визначають залежно від вхідного інформаційного потоку. Здебільшого джерелом таких даних є таблиця технологічних агрегатів (найпрості-

ше джерело даних). Цю таблицю можна створити на підставі поданого іншими підрозділами переліку устаткування, чи одним з автоматизованих методів (наприклад, формування цього переліку з технологічної схеми та схем підсистем інженерного забезпечення об'єкта).

Модифікований статистичний метод придатний для визначення розрахункових електричних навантажень для різних структурних рівнів СЕП (об'єкт, трансформаторна підстанція, шинопровід, лінія, розподільна шафа, щиток тощо).

Результати розрахунків за модифікованим статистичним методом доцільно надати роздрукованими у вигляді таблиці 5, а в процесі виконання лабораторної роботи також сформувані і в електронному вигляді в ПК.

Порядок виконання роботи

1. У відповідності з даними свого завдання (див. табл. 6) необхідно виконати розрахунок навантажень групи СП або вузла системи електропостачання.

2. Дані про $\cos\phi$, K_e та ін., необхідні для виконання розрахунків, треба знайти у довідковій літературі.

3. Усі розрахунки виконувати у прикладному пакеті "Microsoft Excel" в табличній формі (див. табл. 1 і табл. 5).

4. Дослідити порядок розрахунку електричних навантажень розглянутими методами та виконати порівняльний аналіз отриманих результатів.

Оцінювання знань з напряму лабораторної роботи відбувається шляхом перевірки розрахункової частини та усного опитування за наведеними контрольними запитаннями.

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.

2. Таблиці з вихідними даними, довідковими коефіцієнтами і результатами обчислень за наведеними методиками у твердій копії та електронній формі на окремому носії.

3. Висновки за отриманими результатами розрахунків.

Контрольні запитання

1. Для яких цілей введені показники ГЕН і для вирішення яких задач вони використовуються на практиці?

2. Які існують методи визначення електричних навантажень і в яких випадках вони застосовуються?

3. Які переваги та недоліки статистичного модифікованого методу?

4. Які показники ГЕН використовуються при обчисленні розрахункових навантажень кожним з розглянутих методів?

Розрахунок електричних навантажень статистичним модифікованим методом

№ п/п	Найменування вузлів живлення і груп струмоприймачів	Кількість струмоприймачів	Встановлена потужність, приведена до ТВ=100%,кВт		Коефіцієнт використання	cos φ	tg φ	Середнє навантаження за максимально завантаженою зміною		Ефективна кількість СП	Коефіцієнт розрахункової акт. потужності $K_p = f(n_e; K_B)$	Максимальне навантаження			$I_M = S_M / (\sqrt{3} \cdot U_n), A$	Сума квадратів $P_{ном.і}$
			P_n	$\sum P_n$				$P_{зм} = K_B \cdot \sum P_n$ кВт	$Q_{зм} = P_{зм} \cdot tg$ квар			$P_p = K_p P_{зм}$ кВт	Q_p , квар	S_p , кВА		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1																
2	Металорізальні верстати:															
3																
4		Вентилятори, насоси														
5	Освітлення															
	Разом по дільниці															

Таблиця 6

Вихідні дані до виконання лабораторної роботи (потужність і кількість струмоприймачів 0,38-0,66 кВ)

Потужність струмоприймачів, кВт	Варіанти																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Металорізальні верстати:																									
30	5	4	3			4	7	6	1	2	3		2	2	3		4		1	4	1	4	6	3	5
55	1	1	2	3	1	1		6	2	2	1	5	6	4	3	4		5	4	4	5			7	1
13	3	1		2	5		4		1	2		3			5	4	5	7				4	1		2
Вентилятори:																									
22	4	2	2	3	5	1	3		7	5		1	4	4		2	2	6	2	1	1	4	4	3	1
7.5			1		2	1	5	6		1	4	3	1	3	7	5	2	3	7	2	4	2	3	4	5
Відцентровані насоси:																									
75	2	5	3	6	2		4	3	1	7		1	2	3	4	3	1	3	1	2		8	7	5	1
60	6	3	4		1	4	5	3	2		3	4	4	5		1	5	1	3	6	8		1	2	7
Освітлювальні прилади:																									
0.7	25		20		15		35		10		29		24		38		12		13		11		14		9
1.0		30		18		21		23		45		17		19		42		26		33		22		36	

4. Лабораторна робота ОВРСЕ-4 «Компенсація реактивної потужності в електричних мережах»

Мета роботи: досягти результату навчання: знати і розуміти принципи роботи електричних систем та мереж, силового обладнання електричних станцій та підстанцій і вміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності, а також вміти застосовувати придатні емпіричні і теоретичні методи для зменшення втрат електричної енергії при її виробництві, транспортуванні, розподіленні та використанні, через оволодіння методикою вибору джерел компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

Загальні положення

Теоретичні відомості.

1. Джерелами реактивної потужності в мережі 0,38 кВ промислових підприємств є конденсаторні батареї.

2. Недокомпенсована реактивна потужність покривається перетоком реактивної потужності з високовольтної мережі.

3. При вирішенні задач компенсації реактивної потужності необхідно встановити оптимальне співвідношення між джерелами реактивної потужності НН і ВН, приймаючи до уваги втрати електроенергії на генерацію реактивної потужності джерелами НН і ВН, втрати електроенергії на передачу реактивної потужності з високовольтної мережі і здорожчання цехових ТП у випадку завантаження їх реактивною потужністю.

4. Наявні синхронні двигуни 6-10 кВ (компресори, вентилятори) виступають потенційними джерелами реактивної потужності за умови їх експлуатації в режимі перезбудження. Компенсуюча спроможність двигунів суттєво залежить від коефіцієнта завантаження за активною потужністю і допустимого значення випереджального $\cos\varphi$. Середній коефіцієнт завантаження для даних двигунів – 0,85. Величина випереджального $\cos\varphi$ обмежена термічною стійкістю обмотки збудження, і для більшості СД складає $\cos\varphi=0,9$.

Втрати активної потужності на елементарній ділянці електромережі визначається виразом:

$$\Delta P = \left(\frac{P + \delta P}{U} \right)^2 \cdot R + \left(\frac{Q + \delta Q}{U} \right)^2 \cdot R = \Delta P_p + \Delta P_q, \quad (1)$$

де P , Q – потужності на даній ділянці, що визначаються тільки потужністю навантаження, кВт, квар;

δP , δQ – втрати активної і реактивної потужності на попередніх ділянках схеми, кВт, квар;

R – активний опір ділянки, Ом.

Для електричних мереж з радіальною схемою живлення велике значення має правильне визначення місця, де повинен бути встановлений груповий компенсуючий пристрій. Поблизу центру навантажень коефіцієнт потужності най-

більш низький і реактивна потужність піддається значним коливанням. У цих умовах потужність конденсаторних установок повинна автоматично регулюватися.

Виконаємо вибір батарей конденсаторів за заданими вихідними даними:

$$N_{T.онт} = 2; \beta = 0,65; S_{ном.Т} = 1000кВА;$$

$$P_{м.цех} = 1109,8кВт; Q_{м.цех} = 1198,8квар; L_{кЛ10} = 1,38км$$

Таблиця 1

Характеристика трансформаторів ТСЗ-1000/10.

Тип	Uкз, %	ΔPкз, кВт	ΔPхх, кВт	ΔQхх, квар	Iхх, %	Номінальна на- пруга обмоток	
						ВН	НН
ТСЗ-1000/10	5,5	7,8	1,3	14	1,4	10	0,4

Схему електропостачання наведена на рисунку 1.

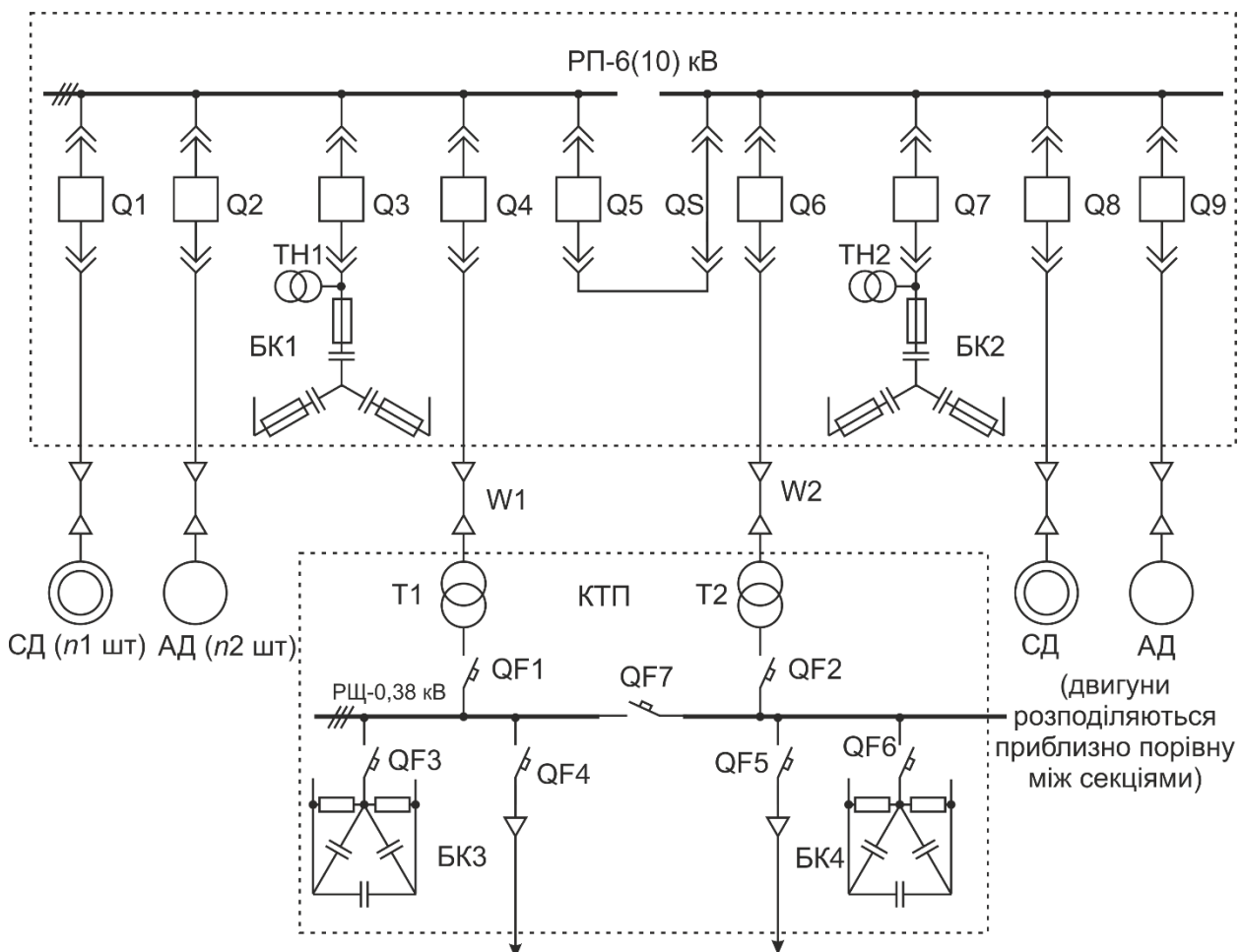


Рис. 1 – Схема електропостачання до прикладу розрахунку

За встановленою кількістю трансформаторів визначаємо найбільшу реактивну потужність, яку доцільно передати через трансформатори в мережу напругою до 1 кВ :

$$Q_T = \sqrt{(N_{T, \text{опт}} \beta S_{H.T})^2 - P_M^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,65 \cdot 1000)^2 - 1109,8^2} = 677 \text{ квар.} \quad (2)$$

Як основний засіб компенсації на промислових підприємствах застосовуються батареї статичних конденсаторів.

Сумарна потужність батарей конденсаторів напругою нижче 1 кВ для даної групи трансформаторів визначається:

$$Q_{HK1} = Q_{M.C} - Q_T = 1198,8 - 677 = 521,8 \text{ квар,} \quad (3)$$

де $Q_{M.C}$ – розрахункове максимальне реактивне навантаження споживачів напругою до 1 кВ, квар.

Додаткова потужність БК напругою до 1 кВ, яка потрібна для оптимального зниження втрат у трансформаторах:

$$Q_{HK2} = Q_{M.C} - Q_{HK1} - \gamma N_{T, \text{опт}} S_{H.T}, \quad (4)$$

де γ – розрахунковий коефіцієнт, що визначається по кривим залежно від показників K_{p1} , K_{p2} , номінальної напруги та схеми живлення цехової підстанції. Для магістральної схеми живлення і довжині живлячої лінії 1,38 км, потужності трансформаторів 1000 кВА та при тризмінному графіку роботи маємо: $K_{p1}=11$, $K_{p2}=10$, $\gamma = 0,39$.

$$Q_{HK2} = 1198,8 - 521,8 - 0,39 \cdot 2 \cdot 1000 = -103,0 \text{ квар.}$$

Сумарна потужність БК на напругу до 1 кВ:

$$Q_{HK} = Q_{HK1} + Q_{HK2} = 521,8 + 0 = 521,8 \text{ квар.} \quad (5)$$

Розрахункове реактивне навантаження в мережі 10 кВ підприємства Q_B складається з розрахункового навантаження приймачів 10 кВ $Q_{p.в}$, недокомпенсованого навантаження Q_T мережі до 1 кВ, що живиться через цехові трансформаторні підстанції, втрат реактивної потужності та визначається:

$$Q_{BC} = Q_T + n \cdot \Delta Q_T, \quad (6)$$

де ΔQ_T – реактивна потужність втрат трансформатора, квар.

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{XX} + \Delta Q_{K3} = 15 + 23,2 = 38,2 \text{ квар;}$$

$$Q_{bc} = 677 + 2 \cdot 38,2 = 753,5 \text{ квар.}$$

Розрахунок оптимальної потужності КУ виконується для режиму максимального навантаження. При виборі потужності КУ з припущенням про незначну довжину ліній на підприємстві можна представити все підприємство як вузол мережі, до якого підключено реактивне навантаження і наявні типи джерел реактивної потужності. Для досліджуваного підприємства на стороні 10 кВ знаходяться лише синхронні двигуни компресорних станцій, які додатково слід використовувати як джерела реактивної потужності. Також наявні високовольтні споживачі 10 кВ (асинхронні двигуни), реактивну потужність $Q_{p.v}$ яких також необхідно компенсувати.

Таблиця 2

Характеристика електроприймачів 10 кВ

Електроприймачі 10 кВ	тип	n , шт	P_n , кВт	K_3	$\cos\phi$	η , %	ω , об/хв
Двигуни : асинхронні синхронні	АК	6	1600	0,8	0,82	85	
	СДН	4	800	0,85	0,9 (вип)	90	3000

Згідно встановленого нормативу [2] $\text{tg}\phi \leq 0,25$ в точці балансової належності, тобто реактивна потужність енергосистеми Q_{EC} може становити до 25 % від розрахункової активної потужності підприємства.

Дано оцінку компенсуючої спроможності додаткових джерел реактивної потужності (окрім батарей статичних конденсаторів – БК) в умовах системи електропостачання підприємства.

Реактивна потужність, що генерується синхронними двигунами, визначається:

$$Q_{CD \min} = \frac{P_{CD \text{ном}} \cdot \beta_{CD} \cdot \text{tg}\phi_{CD \text{ном}} \cdot n_{CD}}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (7)$$

де $P_{CD \text{ном}}$ - номінальна потужність синхронного двигуна;

β_{CD} - коефіцієнт завантаження за активною потужністю;

n_{CD} - кількість працюючих СД;

$\eta_{\text{ном}}$ - номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна.

Для СД з $P_{\text{ном}} = 800$ кВт:

$$Q_{CD \min} = \frac{800 \cdot 0,85 \cdot 0,48 \cdot 4}{0,9} = 1450 \text{ квар.}$$

Реактивна потужність, що споживається асинхронними двигунами 10 кВ, визначається:

$$Q_{AD} = \frac{P_{ADном} \cdot K_{з.АД} \cdot tg\varphi_{AD} \cdot n_{AD}}{\eta_{ном.АД}} = \frac{1600 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 6}{0,85} = 6324 \text{ квар.} \quad (8)$$

З рівняння балансу реактивних навантажень для вузла на стороні 10 кВ визначаємо потужність батарей конденсаторів:

$$Q_{БКВ} = Q_{вс} - Q_{СД} + Q_{AD} = 753,5 - 1450 + 6324 = 5627,5 \text{ квар.} \quad (9)$$

Таким чином, необхідно встановити батареї конденсаторів на стороні 0,4 кВ загальною потужністю 550 квар, а на стороні 10 кВ – 5600 квар.

Приймаємо до установки дві конденсаторні установки АКУ-0,4-275/25 на стороні 0,4 кВ. На стороні 10 кВ встановлюємо на кожну секцію шин по дві конденсаторні установки типу АКУ-10,5-1800-150У3, АКУ-10,5-1000-200У2.

Вибір структури та конструктивного виконання системи компенсації реактивної потужності

Висока ефективність компенсації реактивних потужностей досягається при правильному вирішенні питань вибору потужності батарей, місця установки і регулювання потужності. При вирішенні питань регулювання визначається кількість ступенів регулювання, потужність кожного ступеня і послідовність їх включення. Найуспішніше їх можна вирішити за допомогою графіка навантажень, що діє.

Як вказувалося вище, велике значення має правильне визначення місця в електричних мережах, де повинен бути встановлений груповий компенсуючий пристрій. Вибране місце установки поблизу центру навантажень цеху має коефіцієнт потужності найбільш низький і реактивна потужність піддається значним коливанням. У цих умовах потужність конденсаторних установок повинна автоматично регулюватися.

При виборі потужності компенсуючих пристроїв в умовах застосування автоматичного регулювання слід враховувати, що надмірне дроблення потужності комплектних конденсаторних установок (ККУ) приводить до значного здорожчання через потребу апаратури управління, вимірювання і ін.

Вибір потужності компенсуючих пристроїв виконується відповідно до директивних документів. Враховуючи результати розрахунків в цехах заводу встановлюються конденсаторні батареї загальною потужністю 550 квар напругою 0,4 кВ. Для забезпечення нормальної роботи необхідно застосовувати регульовані компенсуючі установки, що автоматично регулюють коефіцієнт потужності за допомогою мікропроцесорного регулятора з кратністю регулювання 25 квар.

На стороні 10 кВ на кожну секцію встановлюються конденсаторні установки типу АКУ з потужностями 1800 і 1000 квар загальною потужністю 5600 квар зі ступенями регулювання 150 або 200 квар.

Для мінімізації капітальних та експлуатаційних витрат установки компенсації реактивної потужності встановлюються як можна ближче до центрів її споживання та пропорційно споживаним реактивним потужностям. При радіальній схемі установки компенсації реактивної потужності розміщуються на головному розподільчому щиті цехової підстанції, за рахунок чого зменшується перетікання реактивної енергії від енергосистеми до споживачів 0,4 кВ та відповідно – втрати активної і реактивної енергії в високовольтних живлячих кабелях і трансформаторах.

Розрахунок зменшення витрат електричної енергії в елементах мережі

Електропостачання підприємства супроводжується додатковими втратами електроенергії в електричних мережах, пов'язаними зі значними перетоками реактивної потужності.

Оцінимо зниження витрат електричної енергії в живлячих лініях та трансформаторах у випадку компенсації реактивної потужності на стороні електромережі 0,4 кВ. Завантаження трансформатора $K_3 = 0,65$ (з урахуванням компенсації реактивної потужності на стороні 0,4 кВ). Тривалість часу використання максимального навантаження $T_M = 3800$ год.

Показники електроспоживання:

- до компенсації $P_{M1} = 1109,8$ кВт; $Q_{M1} = 1198,8$ квар; $S_1 = 1633,6$ кВА.
- після компенсації $P_{M2} = 1109,8$ кВт; $Q_{M2} = Q_{M1} - Q_{HK} = 1198,8 - 550 = 648,8$ квар; $S_2 = 1285,5$ кВА.

Втрати електричної енергії при завантаженні елементів мережі активною потужністю і компенсації реактивної:

- в постачальній кабельній лінії:

$$P_{1\Delta A.кл} = 3\tau \cdot T \cdot n_l \sum I_M^2 \cdot R = 3\tau \cdot T \cdot n_l \sum \left(\frac{S_1}{\sqrt{3}U_{НОМ}} \right)^2 \cdot R, \quad (10)$$

$$P_{2\Delta A.кл} = 3\tau \cdot T \cdot n_l \sum I_M^2 \cdot R = 3\tau \cdot T \cdot n_l \sum \left(\frac{S_2}{\sqrt{3}U_{НОМ}} \right)^2 \cdot R$$

де $\tau_{НО} = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{3800}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 2225$ год – час найбільших втрат;

льших втрат;

$T = 158,84$ коп/кВт·год тариф на електроенергію, грн/кВт·год;

n_l – кількість ліній.

$$P_{1\Delta A.кл} = 3 \cdot 2225 \cdot 1,58 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \left[\left(\frac{1633,6}{\sqrt{3} \cdot 10} \right)^2 \cdot (0,87 \cdot 1,38) \right] = 225 \text{ тис. грн.}$$

$$P_{2\Delta A.кл} = 3 \cdot 2225 \cdot 1,4802 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \left[\left(\frac{1285,5}{\sqrt{3} \cdot 10} \right)^2 \cdot (0,87 \cdot 1,38) \right] = 138 \text{ тис. грн.}$$

$$\Delta P_{\Delta A.кл} = 225 - 138 = 87 \text{ тис. грн.}$$

- в цехових трансформаторах:

$$I_{\Delta A.T} = n_T \cdot T \cdot (\Delta P_{xx} T_p + \Delta P_{кз} K_3^2 \tau_{нб}), \quad (11)$$

де n_T – кількість трансформаторів; T_p – число годин роботи трансформатора на рік; .

Коефіцієнти завантаження трансформатора:

- до компенсації $K_3 = 1633/(2 \cdot 1000) = 0,82$;

- після компенсації $K_3 = 1285,5/(2 \cdot 1000) = 0,65$.

$$P_{1\Delta A.T} = 2 \cdot 1,58 \cdot (1,3 \cdot 8760 + 7,8 \cdot 0,82^2 \cdot 2225) \cdot 10^{-3} = 73 \text{ тис. грн};$$

$$P_{2\Delta A.T} = 2 \cdot 1,58 \cdot (1,3 \cdot 8760 + 7,8 \cdot 0,64^2 \cdot 2225) \cdot 10^{-3} = 58 \text{ тис. грн};$$

$$\Delta P_{\Delta A.T} = 73 - 58 = 15 \text{ тис. грн.}$$

Засоби компенсації реактивної потужності дозволяють уникнути додаткових втрат активної потужності в опорах елементів цехових мереж і збільшити їх пропускну спроможність.

Сумарне зменшення вартості втрат електричної енергії:

$$\Delta P_{wQ} = 87 + 15 = 102 \text{ тис. грн.}$$

Зменшення плати за перетікання реактивної електроенергії

Приведення нормативних показників в точці балансової належності до значень, що диктує енергопостачальна організація, дозволить зменшити плату за реактивну електроенергію, уникнути надбавок у платі за неналежне оснащення споживача засобами компенсації реактивної потужності.

Установка автоматичних конденсаторних установок на стороні 0,4 кВ в мережах споживача дозволить:

- знизити загальні витрати за спожиту електроенергію;
- зменшити втрату в живлячих лініях і трансформаторах.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з теоретичною частиною та передумовами щодо компенсації реактивної потужності в електричних мережах.
2. Виконати вибір потужності батарей конденсаторів в електричних мережах 0,4-10 кВ.
3. Виконати розрахунок втрат активної потужності та грошових витрат до та після встановлення засобів компенсації РП на напругу 0,4 кВ.
4. Зробити висновок щодо доцільності встановлення засобів компенсації РП.

Оцінювання знань з напрямку лабораторної роботи відбувається шляхом перевірки розрахункової частини та усного опитування за наведеними контрольними запитаннями.

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Розрахунки згідно пунктів 2-3 порядку виконання роботи.
3. Однолінійна схема електропостачання з фактичним електрообладнанням, яке вибрано за вихідними даними та розрахунками.
4. Висновки щодо результатів виконаних розрахунків.

Контрольні запитання

1. Засоби компенсації реактивної потужності.
2. Як визначаються втрата потужності в елементах СЕП?
3. Принципи структури та конструктивного виконання системи компенсації реактивної потужності.
4. Порядок розрахунку потужності конденсаторних батарей на напругу 0,4 та 10 кВ.

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Основні:

1. Добовий графік виробництва/споживання електроенергії. Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnytstva-spozhyvannya-e-e/>
2. Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електроенергетики та електропостачання: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2007.– 380 с.
3. Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення. ДБН В. 2.5-23-2010. – К.: Держ. ком. України з буд-ва. та архіт., 2004. – 129 с.
4. Ціни та тарифи [Електронний ресурс] www.nerc.gov.ua/
5. Разумний, Ю.Т. Енергозбереження: навч. посіб. / Ю.Т. Разумний, В.Т. Заїка, Ю.В. Степаненко. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 166 с.
6. Разумний Ю.Т. Аспекти вирішення проблеми нерівномірності споживання електричної енергії: моногр. / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов; Мін-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2012. – 95 с.
7. Енергетика України 2018. Інфорграфічний довідник. Видання 2-ге. – 2018. – 44 с. Режим доступу: <https://businessviews.com.ua/ru/the-infographics-report-energy-of-ukraine-2018/>

Додаткові:

1. Нерівномірність графіка навантаження енергосистеми і способи його вирівнювання [Електронний ресурс] / В.А. Маляренко, І.Д. Колотило, І.Є. Нечмоглод. – Режим доступу: <http://cyberleninka.ru/article/n/nerivnomirnist-grafika-navantazhennya-energositemi-i-sposobi-yogovirivnyuvannya>
2. Вирівнювання графіка електричного навантаження енергосистеми. Режим доступу: http://www.energetika.by/arch/~page_m21=10~news__m21=169.
3. Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлюваних джерел енергії у зарубіжній енергетичній сфері. Київ – 03/2018. Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/04/1.-Stan-rozvytku-smart-grid.pdf>
4. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «БЕЗПЕКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНІСТЬ». Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>
5. Звіти з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей НЕК «Укренерго». Режим доступу: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyhpotuzhnostej/#1596701774919-04e9ab60-f849>
6. В.П.Калінчик, О.В. Скачок. Оцінка та аналіз методів вирівнювання графіків навантаження виробничих систем. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №3, С. 57-61, Режим доступу: <http://energy.kpi.ua/article/view/148035/147335>.

Методичне видання

Луценко Іван Миколайович
Рухлова Наталія Юріївна
Кошеленко Євген Валерійович
Циган Павло Сергійович
Кириченко Марина Сергіївна

Методичні рекомендації до лабораторних занять
з дисципліни «Основи виробництва, розподілу та споживання електроенергії»
для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Підготовлено до друку та видруковано
у НТУ «Дніпровська політехніка»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004 р.
49005, м Дніпро, просп. К. Маркса, 19.